



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**NÁHRADA DÁLKOVÉHO TEPLA Z FOSILNÍCH PALIV
ENERGIÍ Z ODPADU**

REPLACING HEAT FROM FOSSIL FUELS BY ENERGY FROM WASTE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Sebastian Ženatý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Putna

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: **Sebastian Ženatý**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Putna**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Náhrada dálkového tepla z fosilních paliv energií z odpadu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Komunální odpad může být považován za částečně obnovitelný zdroj energie a při jeho energetickém využití jím může být nahrazena část fosilních paliv a zároveň omezeny negativní vlivy na životní prostředí díky odklonu od skládkování.

Student se seznámí s technologií energetického využití odpadů se zaměřením na dodávku tepla. Dalším cílem bude vyhodnocení potenciálu snížení produkce skleníkových plynů v případě náhrady dálkového tepla energií z komunálního odpadu a identifikace klíčových parametrů ovlivňujících úsporu CO₂ v modelových lokalitách.

Cíle bakalářské práce:

- Analýza podkladů z veřejných zdrojů týkajících se problematiky CZT.
- Práce s databází sítí CZT v ČR, kterou disponuje ÚPI.
- Zjištění parametrů esistujících sítí CZT důležitých pro produkci CO₂.

Seznam doporučené literatury:

CONNOLLY, David, Brian Vad MATHIESEN, Poul Alberg ØSTERGAARD, Bernd MÖLLER, Steffen NIELSEN, Henrik LUND, Urban PERSSON, Sven WERNER, Jan GRÖZINGER, Thomas BOERMANS, 2013. Heat Roadmap Europe 2050: Second pre-study for the EU27 [online]. B.m.: Aalborg University. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:794796>

SALGADO, Fabricio a Pedro PEDRERO. Short-term operation planning on cogeneration systems: A survey. Electric Power Systems Research. 2008, 78(5), 835–848. ISSN 0378-7796.

TOUŠ, Michal, Martin PAVLAS, Ondřej PUTNA, Petr STEHLÍK a Lukáš CRHA. Combined heat and power production planning in a waste-to-energy plant on a short-term basis. Energy. 2015, 90, Part 1, 137–147. ISSN 0360-5442.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá tématem zpracování odpadu a možnosti jeho energetického využití. V úvodní rešeršní části představuje možné metody zpracování a věnuje se především jejich dopadu na životní prostředí. Následně se blíže soustřeďuje na zařízení pro energetické využití odpadu, kde je opět rozebráno hlavně ekologické hledisko. První oddíl praktické část se zaměřuje na popis nástroje vhodného pro modelaci sítí s teplotními provozy. V druhém oddílu jsou provedeny tímto nástrojem výpočty pro stanovenou teplotní síť. Na závěr jsou získané výsledky o provozu sítě vyhodnoceny a jsou navrženy alternativy provozu.

Klíčová slova

Zpracování odpadu, energetické využití, ekologický dopad

Abstract

This bachelor's thesis deal with the topic of waste treatment and possibility of its energy utilization. Methods of waste treatment are presented in the introduction research part. It is mainly focused on the environmental impact. Subsequently it is concentrated on energy recovery facility, the environmental aspect of which is again the main focus. The practical part starts with a description of a tool suitable for modeling of heating and power plants networks. This tool is used for the calculation of specified heating network in the second practical section. Finally, the results are evaluated and the alternatives of the plant operation are proposed.

Keywords

Waste treatment, energy recovery, environmental impact

Bibliografická citace

ŽENATÝ, Sebastian. Náhrada dálkového tepla z fosilních paliv energií z odpadu [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116852>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Ondřej Putna.

Prohlášení o původnosti

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Náhrada dálkového tepla z fosilních paliv energií z odpadu“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Putny a v seznamu literatury jsem uvedl všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 22. 5. 2019

Sebastian Ženatý

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Ondřeji Putnovi za odborné rady a jeho ochotu při vypracování této bakalářské práce. Poděkování patří i rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu podporovali.

Obsah

1	Úvod	1
2	Metody zpracování komunálního odpadu	4
2.1	Skládkování	4
2.1.1	Struktura skládky	4
2.1.2	Dopad skládky na životní prostředí	4
2.2	Mechanicko-biologická úprava	5
2.3	Energetické využívání odpadu	6
3	Zařízení pro energetické využití odpadu	8
3.1	Ekonomické hledisko	9
3.2	Ekologické hledisko	9
3.2.1	Zátěže	9
3.2.2	Kredity	10
3.3	Porovnání ekonomického a ekologického hlediska	11
4	Modelování	13
4.1	Nástroj vytvořený na ÚPI VUT v Brně	13
4.2	Práce s daným nástrojem	15
4.3	Případová studie	17
4.3.1	Popis parametrů uvažované sítě	17
4.3.2	Výsledky	17
5	Závěr	22
6	Seznam použitých zdrojů	24
7	Seznam použitých zkratk a symbolů	26
8	Seznam použitých obrázků	27
9	Seznam použitých tabulek	28

1 Úvod

V současné době je produkce odpadů globálním problémem. Každým dnem se na celém světě vytvoří miliony tun tohoto materiálu. V roce 2014 bylo v Evropské unii vyprodukováno 2,5 miliardy tun odpadů [1]. Kvůli této skutečnosti je stále více rostoucím odvětvím průmyslu odpadové hospodářství (OH), které se zabývá jeho zpracováním.

Na základě vyhlášky 93/2016 Sb. o Katalogu odpadů Ministerstva životního prostředí České republiky bylo stanoveno rozdělení veškerého produkovaného odpadu do 20 základních skupin dle jeho charakteristik. V rámci této bakalářské práce se bude uvažovat pouze zpracování směsného komunálního odpadu (SKO), z důvodů možnosti jeho energetického využití. SKO tvoří nejvýznamnější část celkové produkce komunálního odpadu (KO). Ministerstvo životního prostředí České republiky definuje KO takto: „Podle platného zákona o odpadech je komunálním odpadem veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti fyzických osob, a který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů, s výjimkou odpadů vznikajících u právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání. Odpadem podobným komunálnímu odpadu je veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání, a který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů.“ [2]

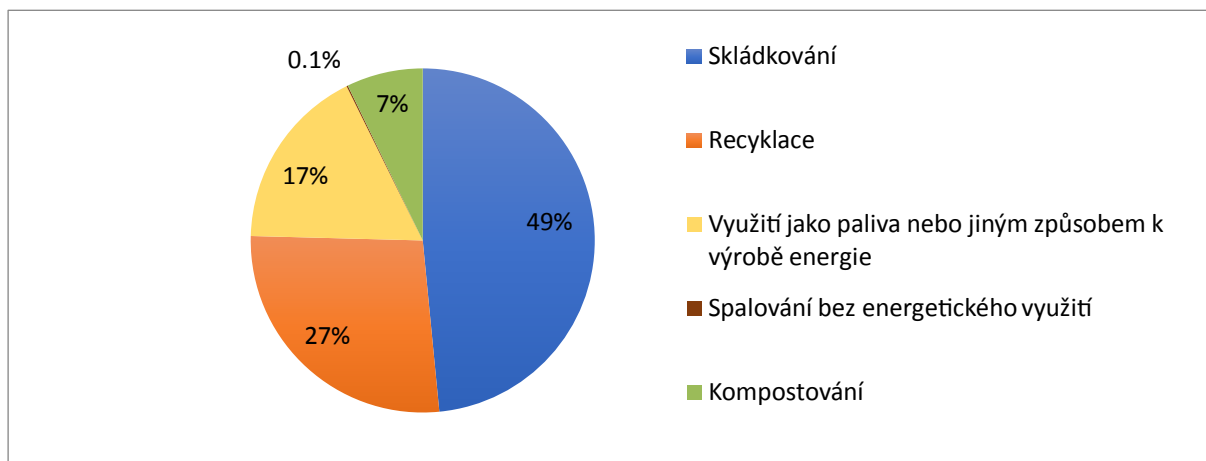
Směrnice Evropského parlamentu a rady 2008/98/ES o odpadech a zrušení některých směrnic upravuje předchozí směrnice a udává pětistupňovou hierarchii nakládání s odpady, uvedenou na obr. 1.1. Základem je prevence vzniku odpadů. Pokud nelze předejít produkci, tak následuje snaha o znovupoužití vyhozeného materiálu. Nikdy není možné veškerý odpad (zvláště SKO) recyklovat. Nerecyklovatelný odpad slouží jako palivo při energetickém využití odpadu (EVO). Posledním bodem je odstranění, tím se rozumí skládkování inertního odpadu, který nemůže být zpracován žádnou předchozí metodou.



Obrázek 1.1 - Hierarchie nakládání s odpady, vytvořena na základě směrnice 2008/98/ES

V roce 2018 vydal Český statistický úřad zatím nejaktuálnější statistiky o produkci odpadů v České republice (ČR). Zde je uvedeno, že produkce odpadu v ČR za rok 2017 činí necelých 25 mil tun, z nichž je 3,6 mil tun KO [3]. Obr. 1.2 naznačuje jak bylo s tímto KO nakládáno. Téměř polovina byla skládkována. Tento fakt se právě

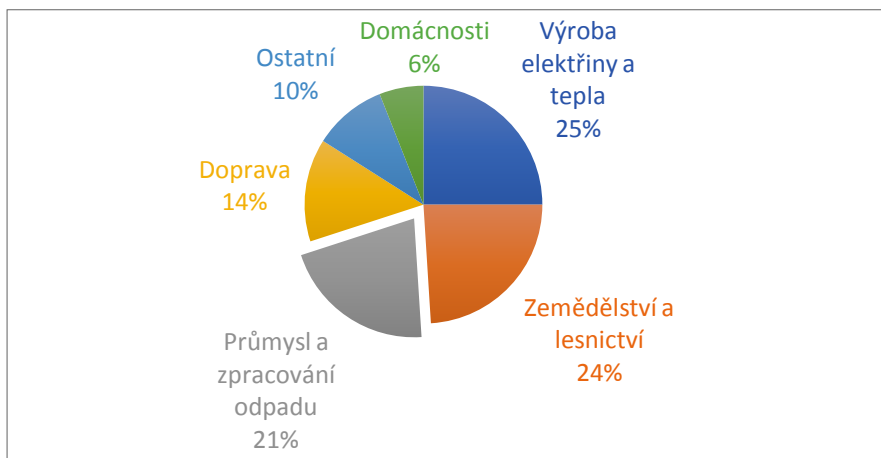
výše zmíněná směrnice Evropské unie (EU) snaží ve svých členských zemích potlačit.



Obrázek 1.2 - Nakládání s KO v ČR v roce 2017 [3]

Stále více se odborníci zabývají negativním dopadem sektoru OH na životní prostředí. Pravděpodobně nejdiskutovanějším a nejzásadnějším environmentálním problémem současnosti je globální oteplování, na kterém se značnou měrou podílí produkce tzv. skleníkových plynů. Vliv různých látek na globální oteplování se hodnotí prostřednictvím GWP (Global Warming Potencial). Pro vyjádření emisí skleníkových plynů se využívá jednotka určující ekvivalent oxidu uhličitého tzv. CO₂eq. Tato jednotka zahrnuje všechny produkované skleníkové plyny. Jejich dopad na životní prostředí je přepočítán podle tabulkových hodnot na číslo vyjadřující stejný vliv jako by měl oxid uhličitý (CO₂), který je označován jako plyn s největším celkovým vlivem na globální oteplování a zároveň bývá ve většině sektorů nejprodukovanějším plynem. Z těchto důvodů se k němu poměřují zbylé skleníkové plyny.

Z obr. 1.3 vyplývá, že největším celosvětovým producentem skleníkových plynů je výroba elektřiny a tepla a zemědělství a lesnictví. Tito dva producenti společně vyprodukují téměř 50 % celkového množství skleníkových plynů. Zpracování odpadu je řazeno při dělení na ekonomické sektory k průmyslu a společně zabírají 21 % světové produkce CO₂eq. Pět procentními body přispívá k této emisi skleníkových plynů právě OH. Přičemž je z 90 % tvořeno skládkováním [4]. Za velké zastoupení skládkování v produkci CO₂eq může převážně fakt, že se jedná o aktuálně nejrozšířenější metodu zpracování odpadu.



Obrázek 1.3 - Celosvětové emise skleníkových plynů z různých ekonomických sektorů [4]

Z důvodu negativních vlivů skleníkových plynů na životní prostředí se rozhodly vlády začít omezovat produkci CO_2eq . Jako nástroj jim k tomu slouží i mezivládní dohody, které jsou vymáhány na podnicích formou předpisů a nařízení.

V roce 2005 průmyslové země podepsali tzv. Kjótský protokol, který je zavazoval ke snížení emise skleníkových plynů. Na tento pakt v roce 2015 navázala Pařížská dohoda v rámci Rámcové úmluvy OSN (Organizace spojených národů) o změně klimatu. Evropská unie se snaží dodržet své závazky ohledně snižování negativních dopadů na životní prostředí, proto za tímto účelem vytvořila projekt obchodu s povolenkami na emisi skleníkových plynů (EU Emissions Trading System – EU ETS). Systém je založen na každoročním výdeji určitého maximálního množství povolenek, které se každým rokem zmenšuje. Jednotlivé podniky poté s těmito povolenkami mohou obchodovat. Tím pádem firmy v součtu nemohou, nebo pod velkým finančním postihem, produkovat více skleníkových plynů, než kolik nařídí EU. Tento projekt se nyní nachází ve své 3. fázi (2013-2021) a pokrývá 45 % producentů skleníkových plynů, mezi jinými i teplárenské a elektrárenské podniky. Konečný stav je 4. fáze, přičemž s každou další fází narůstá počet typů skleníkových plynů a typů odvětví, které pod tuto regulaci spadají. Na konci aktuální fáze v roce 2020 mají být emise sníženy o 21 % oproti roku 2005, kdy byl EU ETS zřízen a v roce 2030 má dojít dokonce ke snížení o 43 % celkového množství produkováných skleníkových plynů [5].

Problém výše popsané ekologické zátěže samozřejmě ovlivňuje i OH, a proto jsou v dnešní době tlaky na snižování emise skleníkových plynů i zde. Jedním z možných řešení je nahrazení skládkování SKO, které produkuje značné množství CO_2eq , metodou spalování odpadů. Při této technologii navíc kromě zlikvidování odpadu vzniká i vedlejší produkt, kterým je teplo, případně elektrická energie.

2 Metody zpracování komunálního odpadu

Pomocí zjednodušené metodiky Life-Cycle-Assessment (LCA) se vyhodnocuje ekologická zátěž zpracování odpadů na životní prostředí. V této metodice je vyhodnocováno hned několik faktorů: globální oteplování, humánní toxicita, acidifikace, tvorba fotooxidačních látek atd. [4]. V oblasti OH a energetice se globální oteplování považuje za vliv, který má největší dopad na GWP. Při zpracování odpadu můžou působit i environmentálně pozitivní činnosti. Mezi ně patří např. hodnota, o kterou se sníží produkce skleníkových plynů díky nahrazení fosilních paliv odpadem.

2.1 Skládkování

Jedná se o metodu, která je pro oblast OH nejvíce rozšířená. Při procesu skládkování je SKO svezeno na určité místo a zde je trvale skladován po dobu, než se jeho složky postupně rozloží.

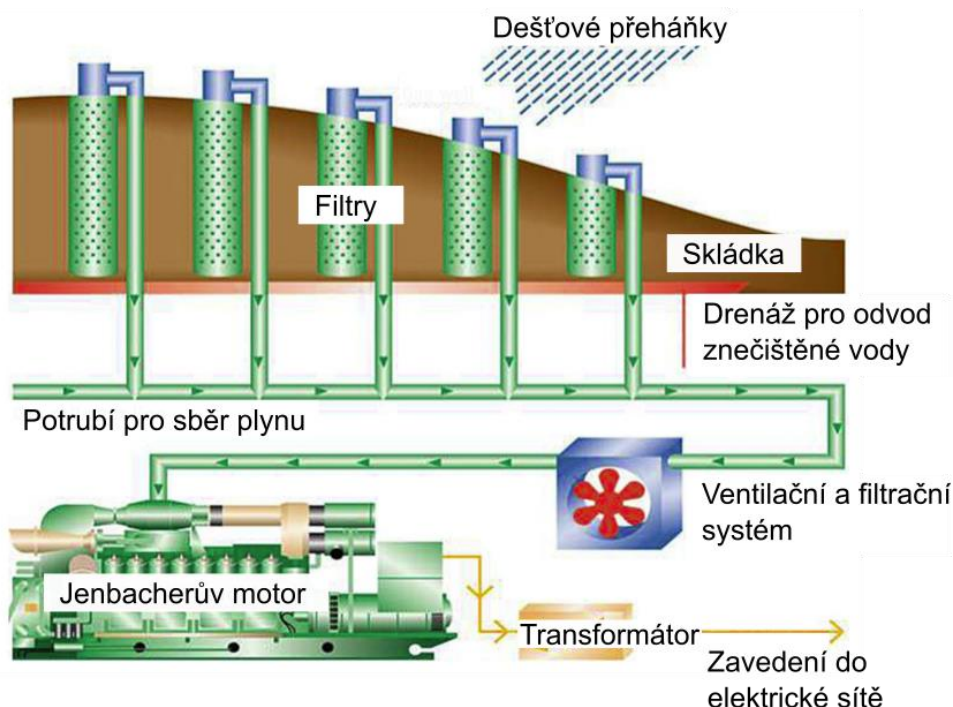
2.1.1 Struktura skládky

Skládkové místo je nejčastěji vytvořeno prohlubní v zemi, která je následně zavážena odpadem. Odpad musí být roztříděn podle složení na jednotlivé typy, aby zde nedošlo ke kontaminaci okolní půdy následkem rozpadu některých nebezpečných toxických látek. Každá skládka je tvořena několika sektory, které plní určitou funkci, jak je ukázáno na obrázku 2.1. Spodní část slouží jako ochrana před znečištěním okolí. Má za úkol oddělit odpad a škodlivé látky z něj unikající od okolní půdy a podzemních vod. Na této vrstvě je systém drenáží, které odvádějí tzv. výluh do sběrných nádrží. Výluh je ve své podstatě dešťová voda, která proteče odpadem a při svém průtoku zachytí nepříznivé látky pro životní prostředí. Na drenáž je naveden odpad určený ke skládkování a po zaplnění celého prostoru je následně vrstva odpadu překryta zeminou [6].

2.1.2 Dopad skládky na životní prostředí

Vedle již zmíněné environmentální zátěže, vzhledem k možnému úniku toxických látek do okolní půdy a podzemních vod, je zde i závažnější problém, protože skládkování se nemalou měrou podílí na globálním oteplování. Při procesu rozkladu odpadu vznikají na skládkách metan (CH_4) a oxid uhličitý [7], které se řadí mezi skleníkové plyny. Proto množství úniku těchto plynů vstupuje do propočtů GWP jako hlavní parametr environmentální zátěže. Na velikosti hodnoty vyprodukovaného CO_2eq skládkováním mají vliv dva základní faktory. Prvním z nich je složení odpadu, respektive procentuální množství biologického odpadu, jelikož bakterie při anaerobním procesu rozkládají tento odpad a jedním z hlavních produktů jsou právě metan a oxid uhličitý [7]. Druhým vlivem je schopnost zachycení těchto plynů, aby neunikly do atmosféry. Plyn je odváděn buď pasivně, díky svému vnitřnímu teplu stoupá na povrch, nebo je aktivně odsáván pomocí vhodného systému filtrů, potrubí a větráků. Plyn je poté uskladněn v zachytávacích nádržích. Vzhledem k technologii, jakou skládka používá, se může úspěšnost zachycení skleníkových plynů pohybovat ve značném rozmezí.

Zachycený plyn putuje k dalšímu zpracování. Je možné ho pouze spálit ve speciálních hořácích na odpadní plyn nebo využít při procesu výroby energie, kdy slouží k pohonu generátoru. Příkladem může být skládka se systémem zachycení odpadních plynů a jejich následným energetickým využitím, jak je zobrazena na obr. 2.1.



Obrázek 2.1 - Systém skládky s následným energetickým využitím zachyceného plynu, převzato z [6], upraveno

2.2 Mechanicko-biologická úprava

Další možností nakládání s odpadem je mechanicko-biologická úprava (MBÚ). Tato metoda se sestává ze dvou fází. Vstupní materiál je nejprve roztříděn a poté mechanicky nebo biologicky zpracován. V první části je separován materiál, který nemůže být biologicky rozložen, jako jsou například plasty, kov, sklo atd. Tento odpad je rozdělen na recyklovatelný, jenž je znovu využit ve výrobě jiných produktů, nebo na odpad s vysokou výhřevností, který je následně ve spalovnách přeměněn na energii tepelnou, případně elektrickou. Druhou složkou je biologický materiál, který je transportován k dalšímu zpracování. To probíhá pomocí stabilizace, odpad projde sérií aerobních a anaerobních procesů. Po této úpravě může být skládkován, jelikož se u něj dramaticky snížila možnost další produkce skleníkových plynů na skládce a materiál se stal celkově velmi inertním.

V dnešní době neexistuje příliš mnoho těchto zařízení, případně jsou zjednodušeny o stabilizační fázi biologicky rozložitelného odpadu, který je tudíž převážně na skládku okamžitě po separaci. Třídění v těchto provozech slouží především pro vyseparování odpadu s vysokou kalorickou hodnotou neboli velkou výhřevností. Jedná se především o plasty a papír. Materiál s vysokou kalorickou hodnotou se nazývá odpadové palivo (Refused-derived fuel-RDF). RDF je po separaci dopraven do spaloven, kde je přeměněn na energii.

2.3 Energetické využívání odpadu

Environmentálně příznivým způsobem zpracování odpadu je provozování zařízení na energetické využití odpadu (ZEVO), které je speciálním typem spalovny. ZEVO pracuje na podobných principech jako MBÚ, ovšem nedochází zde k žádné prvotní separaci odpadu, ale je přímo spalován veškerý svezený SKO.

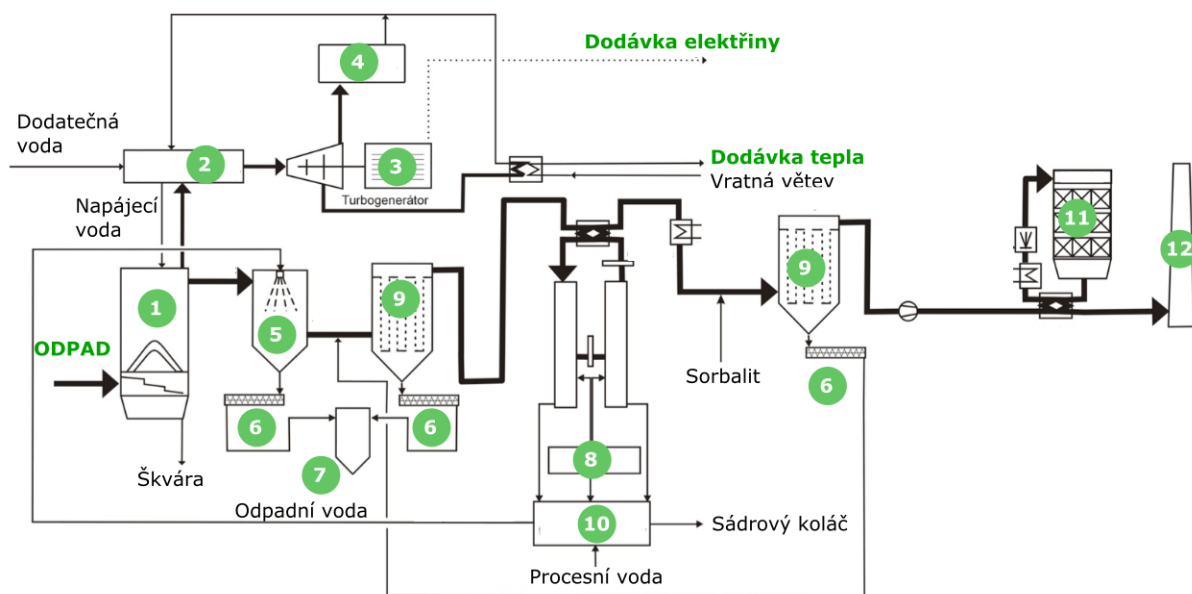
Odpad je přímo přivážen do sběrných prostor umístěných ve spalovnách, které se nazývají bunkry. Z nich se přepraví pomocí dopravníků do kotlů, kde je zpracován. Před procesem spalování dochází k tzv. najíždění kotle, jako palivo se při tomto procesu používá nejčastěji zemní plyn, který může být současně nadále využíván pro stabilizaci hoření.

Energie vzniklá spálením odpadu je uložena ve spalínách, které jsou přivedeny do kotle na odpadní teplo. Pomocí nich je ohřívána voda až do fáze změny skupenství, kdy se z ní stává pára. Jedná se o přehřátou páru (PP), která je transportována k následnému využití. Podle vlastností PP může být použita na výrobu tepla nebo elektrické energie. V prvním případě je PP přivedena do výměníku, kde ohřívá vodu, případně může být exportována přímo ve formě páry a zavedena do sítě centrálního zásobování teplem (CZT). V druhé situaci je PP hnána na turbínu, která slouží jako generátor elektrické energie. V ZEVO se nejčastěji používají kondenzační, přetlakové, nebo odběrové parní turbíny. Rozdíl mezi jednotlivými typy turbín a jejich použití je popsán např. ve Sborníku technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla [8].

Na přiloženém obr. 2.2 je možné vidět schéma tohoto procesu v ZEVO Plzeň. Zde je zakomponována kombinovaná varianta výroby tepla i elektřiny. Kotel je složen z roštového ohniště, na které navazuje parní kotel. Pára je hnána do turbogenerátoru (TG) tvořeného kondenzační odběrovou turbínou. Pára z odběru má ještě parametry vhodné pro využití k ohřevu teplé vody. Na výstupu z nízkotlaké části turbíny je pára přivedena do kondenzátoru, kde kondenzuje bez dalšího využití. Zbývající teplo se maří, jelikož už nemá potenciál na další využití z důvodů příliš nízké teploty.

Vzniklé spaliny obsahují velké množství toxických látek, proto musí projít sérií čistících procesů, než jsou vypuštěny do atmosféry. V každém provozu je nainstalováno několik čistících jednotek, pro konkrétní provoz ZEVO opět znázorněno na obr. 2.2. Spaliny musí být vyčištěny od větších částic, např. prachu a popílku. O tento proces se starají tkaninové filtry a rozprašovací sušárna. Následně je potřeba spaliny, ale i technologickou vodu chemicky upravit, např. odsířením. Schopnost zachycení celkového množství těchto nebezpečných látek poté určuje ekologickou zátěž pro životní prostředí.

Vypouštění látek do ovzduší spalovnou podléhá přísným emisním limitům, které stanovuje v ČR nařízení vlády č. 354/2002 Sb. Proces čištění spalin probíhá v několika zařízeních, filtrech, chemických úpravách atd. Jedná se tedy o velice komplexní systém, jehož popis ale není předmětem této práce.

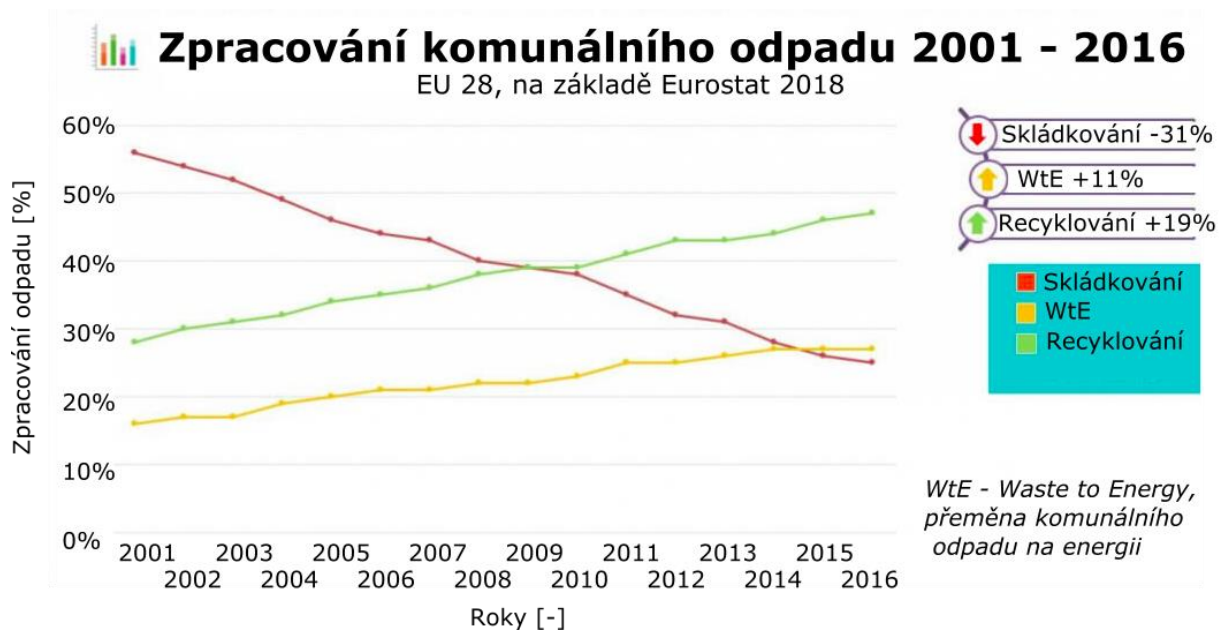


- | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| 1 Roštový kotel | 7 Silo |
| 2 Parovodní systém kotlové vody | 8 Chemikálie |
| 3 Turbogenerátor | 9 Tkaninový filter |
| 4 Vzduchový kondenzátor | 10 Úprava odpadní technologické vody |
| 5 Rozprašovací sušárna | 11 Chemická úprava spalin |
| 6 Prach + reakční zbytek | 12 Komín |

Obrázek 2.2 - Schéma ZEVO Plzeň, převzato z [9], upraveno

3 Zařízení pro energetické využití odpadu

V současné době je trendem upouštění od skládkování SKO. Při zacházení s odpadem se stále více uplatňuje recyklace a následné využití vytríděného odpadu, nebo stavba nových ZEVO. Tuto skutečnost dokládá obr. 3.1, který se zaměřuje na procentuální zastoupení třech hlavních metod zacházení s odpadem (skládkování, recyklace, ZEVO) v EU. Mezi lety 2001-2016 došlo k poklesu skládkování téměř o třetinu, což má výrazně pozitivní vliv na životní prostředí. Přebytný SKO byl převezen k recyklaci, nebo využit ke generování energie.



Obrázek 3.1 - Způsob zpracování odpadu VEU mezi lety 2001-2016, převzato z [10], upraveno

Spalovna určená ke zpracování odpadu s následným energetickým využitím se může zaměřovat na výrobu elektrické nebo tepelné energie. Jaká strategie produkce energie bude u ZEVO použita určuje především jeho kapacita, respektive kolik kt SKO se v něm za rok spálí. ZEVO může existovat v širokém rozsahu kapacit [11]. Na ÚPI VUT v Brně (Ústav procesního inženýrství Vysokého učení technického v Brně) se uvažuje v technicko-ekonomických modelech rozdělení na malé a velké kapacity. Bližšímu zkoumání rozdělení ZEVO podle kapacity a měrných investičních nákladů na zbudování se blíže věnuje například publikace [12].

Pro malé kapacity ZEVO je energie spalovaného odpadu využívána hlavně pro dodávku tepla, případně je zde instalována malá protitlaková turbína s nízkou účinností na pokrytí vlastní spotřeby elektrické energie. Do ZEVO o vyšší kapacitě se mohou instalovat kondenzační odběrové turbíny (KOT). Ty se buď v malých výkonech vůbec nevyrábí, nebo by byly vzhledem k výkonu drahé. U velkokapacitních ZEVO s KOT dochází k produkci většího množství vyrobené elektřiny na jednotku kapacity. Výroba elektřiny v těchto provozech ale stále není srovnatelná s konvenční elektrárnou. Nižší účinnost je zde kvůli omezení parametrů

páry. To je způsobeno rizikem vysokoteplotní chlorové koroze na potrubí přehříváku kotle.

Typ a množství produkce energie jsou hlavními parametry určujícími ekologickou i ekonomickou výhodnost.

3.1 Ekonomické hledisko

Při nakládání s odpadem je v první řadě potřeba určit lokalitu, ve které se uvažuje o výstavbě nového ZEVO. V daném místě je nadále nutné identifikovat důležité charakteristiky, ze kterých vyplyne kapacita spalovny. To je hlavní parametr určující velikost a typ spalovacích kotlů a využití energie vzniklé spalováním odpadu, tím pádem i největší faktory ovlivňující cenu.

Ekonomické hledisko se určuje podle tzv. ceny na bráně. Jedná se o hodnotu, která musí být zaplacená za tunu přivezeného SKO. Cenu na bráně ovlivňují především náklady spojené se spalováním tepla a produkce tepla a elektrické energie, která může být prodávána.

Náklady lze rozdělit na investiční a provozní. Investiční náklady mohou být do velké míry variabilní i pro stejné kapacity ZEVO, například z důvodů pořízení odlišného typu turbíny. Počáteční investice může být značně eliminována, pokud nedochází k výstavbě celého provozu, ale ZEVO je pouze zakomponováno do již existující teplárny přistavením kotle na spalování SKO. Mezi provozní náklady patří peníze za palivo potřebné k rozběhu a stabilizaci procesu spalování, cena za chemikálie nutné k čištění spalin a technologické vody atd.

Na druhou stranu cenu na bráně snižují finance získané z produkce tepla a elektrické energie. Tyto energie většinou vykupují teplárny a následně je zavádějí do rozvodných sítí.

3.2 Ekologické hledisko

ZEVO má dopad na životní prostředí, přičemž při řešení se uvažuje zejména dopad na globální oteplování. Podle typu vlivu lze provést dělení na zátěže a kredity. Zátěže mají negativní a kredity naopak pozitivní environmentální důsledky.

3.2.1 Zátěže

Mezi zátěže můžeme zařadit skleníkové plyny vzniklé spalováním SKO, elektrickou energii a teplo nutné pro provoz a podpurné palivo potřebné pro spalování. Při určení ekologické zátěže je nutné především získat informace o složení SKO, kterým je ZEVO zásobováno. Odpad může být rozdělen do několika kategorií. Nejdůležitějšími údaji jsou procentuální zastoupení dané kategorie, obsah fosilního uhlíku a biogenního uhlíku. Biogenní uhlík uvolněný spalováním není brán jako ekologická zátěž. Jedná se totiž o formu uhlíku, která by byla uvolněna do přírody vždy, díky přirozenému koloběhu látek, které tvoří dané materiály [4]. Na druhou stranu hodnota množství fosilního uhlíku je pro určení ekologické zátěže nejdůležitějším faktorem, jelikož produktem jeho spalování je skleníkový plyn CO_2 . Důležitou charakteristikou SKO je i výhřevnost jednotlivých materiálů, jenž obsahuje. Udává totiž množství energie vzniklé při spálení určitého množství hmoty. Materiály

s velkou výhřevností ale nemusí být ekologicky výhodné spalovat, protože mohou obsahovat velké množství fosilního uhlíku, proto je potřeba tyto dva parametry spolu porovnat.

K zátěžím se řadí také transport odpadu, ten můžeme rozdělit na tři případy. Prvním je svoz SKO z kontejnerů a popelnic na ulici do lokality sběrného místa. Většinou se SKO dopravuje přímo po sběru do spalovny, kde je uskladněn a dále zpracován. Ovšem v některých případech musí být přemístěn na větší vzdálenost do ZEVO, kvůli této skutečnosti může být hodnota vyprodukovaného CO_2eq při převozu odpadu z místa svozu do vzdálené lokality spalovny nezanedbatelná. Posledním typem transferu odpadu je převoz vzniklé škváry a popílku na místa jejich uskladnění.

Odpadní produkt procesů probíhajících v ZEVO je tvorba škváry vzniklé neúplným spálením SKO dodávaného do kotle, popílku zachyceného ve filtrech a chemikálií získaných po čištění procesních vod. Jedná se o nebezpečný odpad, proto musí být skladován na speciálních místech. Tento fakt sice není zahrnut při výpočtech GWP, jelikož při skládování hazardního odpadu nemůže docházet k žádným únikům látek do okolí, ale mezi zátěže na životní prostředí se řadí např. výstavba budov a technologie potřebná na skladování nebezpečného odpadu.

3.2.2 Kredity

Faktory podporující kladný vliv na životní prostředí jsou především výroba tepla, elektrické energie a malou měrou přispívá i recyklace kovu, jenž je vyseparován ze vzniklé škváry po spálení SKO.

Snížení emise skleníkových plynů produkcí energií je způsobeno nahrazením primárních zdrojů paliva, které nemusejí být spotřebovány na výrobu stejného množství energie, jež je dodáno ze ZEVO. Primární zdroje jsou např. uhlí, zemní plyn a lehký topný olej. Při výpočtech dopadu na životní prostředí záleží na druhu paliva, kterým je nahrazovaný kotel zásoben, jelikož hodnoty produkce CO_2eq jednotlivých paliv se mohou výrazně lišit. Udávaná hodnota produkce CO_2eq se nazývá emisní faktor a každé palivo má specifickou velikost této hodnoty. Aby se daly mezi sebou porovnávat jsou vztaženy na množství dodané energie (např. MWh, nebo TJ) z konkrétního typu paliva. Tabulku udávající emisní faktor jednotlivých fosilních lze najít na stránkách Ministerstva životního prostředí [13].

Množství vyprodukovaných skleníkových plynů při stejné dodávce energie zásadně ovlivňuje ekologickou výhodnost zapojení nového ZEVO do systému, jelikož nahrazení kotle na zemní plyn není zdaleka tak environmentálně výhodné jako nahrazení kotle na hnědé uhlí.

Ve sledované oblasti většinou dochází k výrobě elektřiny a tepla z více rozdílných zdrojů paliva. Proto je nutné určit tzv. energetický mix. Jedná se o hodnotu vytvořenou na základě procentuálního zastoupení jednotlivých zdrojů energie. Energetický mix se často řeší na národní úrovni. Pro ČR je podrobný Národní energetický mix uveden na internetových stránkách OTE [14]. Díky stanovení energetického mixu lze určit celkové emise CO_2eq vyprodukované při výrobě elektřiny a tepla. Tuto hodnotu zásadně ovlivňují obnovitelné zdroje, např. větrné, sluneční, vodní, biomasa atd. Je to dáno faktem, že se u nich uvažuje téměř nulová produkce skleníkových plynů (a v případě biomasy velmi nízká). [15]

Spalovna může využít energii uloženou ve spalínách k produkci tepla, nebo elektrické energie. Typ strategie energetické produkce ZEVO významně určuje jeho úsporu emisí skleníkových plynů. Dosažení uspokojivé účinnosti při výrobě elektrické energie požaduje velké vstupní investice a provozní náklady, proto v ZEVO o malých kapacitách je většinou veškerá produkce soustředěna na výrobu tepla, případná produkce elektřiny pouze pokrývá vlastní energetické náklady. U velkokapacitních ZEVO už většinou bývá dodávka energie z kotlů dostatečně velká a má vhodné parametry pro provoz turbogenerátoru. Generování elektrické energie v takovém případě dosahuje vyšší účinnosti. Zbývá pára o nevyhovujících fyzikálních vlastnostech pro další využití na turbíně je odvedena do výměníků, kde je užita pro zásobování teplem. Výsledkem je vznik ZEVO s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla (KVET). Největší úspora CO_2eq nastává při orientaci pouze na produkci tepla. Naopak negativní vliv na životní prostředí má ZEVO, pokud se soustředí pouze na výrobu elektrické energie. To je způsobeno převážně malou účinností při produkci elektřiny oproti produkci tepla. Studie vytvořená na ÚPI VUT v Brně blíže popisuje zmíněné skutečnosti a je popsána v článku [16].

U velkokapacitních ZEVO může docházet k nadvýrobě tepla oproti poptávce v dané lokalitě, tudíž je ekologicky výhodnější část produkovaného tepla nahradit výrobou elektrické energie i přes nižší účinnost.

Zpracování odpadu ve spalovnách nahrazuje jeho skládkování, což redukuje množství nezachycených skleníkových plynů unikajících ze skládek do ovzduší a také únik škodlivých látek do okolní půdy. Díky tomu má ZEVO lepší vliv na životní prostředí než skládky. Spalovna má oproti skládce další neméně důležitou výhodu, kterou ale není možné vyčíslit. Jedná se o sociální stránku. Místa sloužící ke skládkování mívají často dopad na úroveň života v okolí. Zejména ze dvou důvodů. Skládky kazí vizuální vnímání krajiny a také se většinou nedá zabránit úniku zápachu.

3.3 Porovnání ekonomického a ekologického hlediska

V článku [16] byl představen výpočet, u kterého se uvažovalo zohlednění ekonomického a environmentálního kritéria při uvažované výstavbě ZEVO. Z výsledků vyplývá, že tato kritéria jdou do určité míry proti sobě. Se vzrůstající kapacitou ZEVO klesá sice cena na bráně, ale zároveň klesá hodnota uspořené CO_2eq . Při návrhu nového ZEVO je potřeba brát v úvahu jak ekonomické, tak ekologické hledisko a najít mezi nimi kompromis. Aby se obě veličiny mohly porovnávat, jsou vztaženy na tunu odpadu.

Jedním z nejdůležitějších aspektů při porovnávání ekonomického a environmentálního dopadu je typ nahrazovaného primárního zdroje energie. V tabulce 3.1 jsou uvedeny u vybraných primárních zdrojů jejich ceny a emisní faktory. Pro možnost jejich porovnání jsou přepočítány na měrné jednotky. Při srovnání vyplývá, že nejlevnější uhlí má ale na druhé straně největší emisní faktor CO_2 . I v tomto případě jde cena proti ekologické náročnosti daného zdroje. Z tohoto faktu vyplývá, že při snaze o zásadní snížení ekologické náročnosti při výrobě tepla a elektrické energie musí být nahrazeny provozu využívající levné zdroje energie.

Tabulka 3.1 - Produkce CO₂eq a cena paliv, data z interních výpočtů na ÚPI VUT v Brně

Typ paliva	Produkce CO ₂ eq [t CO ₂ eq/MWh]	Cena [Kč/MWh]
Hnědé uhlí	0,36	326,3
Lehký topný olej	0,26	813,
Zemní plyn	0,20	1064,9

Ideální ekonomické a ekologické hodnoty pro stanovení optimální kapacity ZEVO pro danou lokalitu je možná stanovit pomocí matematických nástrojů, které danou situaci vymodelují.

4 Modelování

V této kapitole bude čtenář seznámen s modelováním provozu teplárenských zařízení, resp. sítí a konkrétním matematickým modelem pro modelaci čistě teplárenských sítí a sítí se ZEVO, který byl vyvinut na ÚPI VUT v Brně. V další části pak autor stanoví vstupní parametry sítě a pomocí zmíněného modelu provede výpočty pro danou případovou studii a jejich interpretaci.

Pro popis situace slouží různé modely založené na nelinearitě (celočíselné nelineární programování, tzv. MINLP–mixed integer non-linear programming), od kterého se ovšem v poslední době ustupuje kvůli obtížné řešitelnosti. Tato metoda je nahrazována lineární metodou (MILP–mixed integer linear programming). Na principu MILP funguje i program pro simulaci dané situace, ve kterém je vypracována následná obecná případová studie.

Při modelování situací pomocí optimalizačních softwarů dochází k potížím s velikou časovou a výkonnostní náročností procesů. Tento problém může být částečně omezen. Simulace totiž probíhá vždy po stanoveném časovém kroku, který může být nastaven na hodinu, den, týden, měsíc, nebo rok a vstupní parametry se zprůměrují v rámci tohoto kroku. Pro přesné modelování se využívá hodinová báze, tzn. vstupní parametry jsou zadávány v hodinových intervalech, kde se bere průměrná hodnota za tuto hodinu a následně jsou pro každý časový krok provedeny výpočty. Přesná simulace je velice výpočetně náročná, proto se pro zjednodušení zavede delší časový úsek kroku. V rámci tohoto zjednodušení může dojít k ovlivnění výsledků v důsledku zavedení chyb průměrováním, ale na druhou stranu je ušetřeno významné množství výpočetního času.

4.1 Nástroj vytvořený na ÚPI VUT v Brně

V rámci následující práce byl použit již vypracovaný systém počítačového kódu a jeho řešení, jenž byl vytvořen na Ústavu procesního inženýrství VUT v Brně pro matematickou optimalizaci. Nástroj je využíván při potřebě optimalizace stávající situace, nebo při začleňování nového ZEVO do stávající sítě CZT. V druhém případě je cílem posoudit možnost integrace a vyhodnocení parametrů ZEVO s následným vyčíslením uspořené primárního zdroje paliva, s čímž úzce souvisí ekonomický i ekologický pohled.

Práci matematického modelování lze rozdělit na dva sektory. První segment je zaměřen na určení hlavních charakteristických parametrů dané oblasti, například:

- Cena elektřiny exportované do sítě
- Cena za zpracování odpadu
- Výhřevnost odpadu
- Poptávka po teple

Pro stanovení některých údajů vznikly na VUT v Brně softwary, např. NERUDA a JUSTINE. Zmíněné optimalizační softwary mají za úkol dodat do systému vstupní data na základě určitých aproximací a odhadů, jak by se proměnné veličiny mohly vyvíjet v průběhu času, pro který má být výpočet proveden. Určité veličiny se do systému zadávají z údajů zjištěných z reálných situací, např. poptávka po teple se

určuje na základě průměrů poptávek po teple ve zkoumané lokalitě za posledních několik let v určitém, stále stejném časovém období [17].

Ve druhé části musí být do nástroje zadány technologické vlastnosti stávající výtopny a předpokládané nově vzniklé ZEVO. Mezi nejdůležitější parametry patří následující znaky:

- Typ kotle
- Kapacita kotle
- Vlastnosti páry jdoucí z kotle
- Možnost napojení turbogenerátoru (TG)
- Typ TG

Při modelování se využívá většinou několik různých kotlů a turbín. I z těchto důvodů jsou důležitým aspektem energetické proudy vzniklé páry. Podle jejích hodnot, hlavně teploty a tlaku, může být přivedena z kotlů na TG nebo být přímo distribuována do sítě CZT. Tato situace musí být v nástroji také zaznamenána.

Jelikož je do systému zavedeno několik kotlů a může nastat nadprodukce, je v softwaru naprogramovaná možnost odstavení jednotlivých kotlů, nebo naopak případný zákaz odstávky. To může být vyžadováno v případě nutnosti provozu kotle pro vlastní spotřebu tepla, nebo elektřiny potřebné pro provoz teplárny. U jednotlivých kotlů musí být také nastaven minimální výkon, jenž je důležitým parametrem určujícím bod zlomu pro vypnutí kotle.

Pro TG se musí určit podobné charakteristiky jako pro kotle. V ZEVO bývá mnohdy využívána kondenzační odběrová turbína, která má více stupňů. Pro účely modelování se uvažují jednotlivé stupně jako několik TG za sebou, přičemž musí být nastaveno, že všechny tyto TG jsou v provozu, nebo naopak všechny odstaveny.

Samotný návrh pro nové ZEVO probíhá ve dvou fázích. Nejprve je nutno v programu vymodelovat aktuální optimalizovaný režim bez a následně i s ZEVO. Nástroj byl původně naprogramován pro navržení situace z hlediska největší úspory financí, tzn. minimálních nákladů. Pro matematické vyjádření používá následující vztah [17]:

$$Z = \sum C_{pal} + \sum C_{emi} + \sum C_{rez} + \sum C_{vap} + \sum C_{ost} - \sum C_{el} \quad (1)$$

kde:

- Z je rozdíl variabilních nákladů a výnosů na výrobu tepla
- C_{pal} je součet nákladů na palivo na všech kotlích
- C_{emi} je součet nákladů na emisní povolenky na všech kotlích
- C_{rez} je součet nákladů na nakládání s rezidui ze všech kotlů
- C_{vap} je součet nákladů na vápenec pro odsíření
- C_{ost} je součet ostatních variabilních nákladů
- C_{el} je součet výnosů z prodeje elektřiny ze všech TG

Výsledný stav tedy udává ekonomicky optimální řešení provozu pouze teplárny. Následná druhá fáze, jež má za cíl přidat do tohoto modelu nově zbudovaný provoz

ZEVO, provede další, obdobný výpočet. Pro vyjádření v programu se ZEVO nahrazuje jedním kotlem. Náklady na v něm spalované palivo jsou určeny jako nulové a výkon je stanoven podle kapacity zařízení. Druhá fáze předkládá tedy výsledky pro ekonomicky optimální situaci po zavedení fiktivního ZEVO.

Program byl z původně čistě ekonomického modelování aktualizován a nyní má možnost i optimalizaci ekologického hlediska. Pro výpočty musely být do systému přidány hodnoty produkovaného množství CO_2eq při spalování jednotlivých typů paliv. Díky této skutečnosti mohou být simulovány i situace založené nejen na úspoře financí, ale i na úrovni stupně environmentální zátěže při produkci tepla. Ovšem ve všech případech stále platí, že základním kritériem, které musí být vždy při těchto výpočtech splněno, je úplné pokrytí poptávky po teple v dané lokalitě.

Hlavním výstupem programové simulace je optimální cena za dodávané teplo, nízká produkce CO_2eq a určení provozu a výkonu daných kotlů a TG při jednotlivých výpočtových krocích. Rozdělení výpočtů na dvě fáze umožňuje porovnat množství uspořených nákladů, převážně za nákup primárních zdrojů paliv, mezi původní situací a po přidání provozu ZEVO. Uspořením primárním zdrojům se kromě zlepšení ekonomické situace ovlivňuje i ekologická. Pro výpočet nízké environmentální zátěže má nástroj rozšiřující funkce. Výsledky na závěr mohou ukazovat různé scénáře:

- Provoz teplárny zaměřen pouze na minimalizaci nákladů
- Provoz teplárny zaměřen na minimalizaci CO_2eq
- Provoz teplárny a ZEVO při různé vyváženosti ekologické a ekonomické důležitosti

4.2 Práce s daným nástrojem

Nástroj pracuje na principu systému výpočtů zadaných v naprogramovaném kódu a jeho následném vyhodnocení.

Vstupní údaje pro kód se zadávají pomocí tabulek vytvořených v softwaru Microsoft Excel (MS Excel). Rozhraní programu pro zadávání vstupních údajů je naznačeno na obr. 4.1. Pole označené světle žlutou barvou jsou charakteristiky systému teplárny a uvažované ZEVO, které se mohou měnit. Po změně údajů je nutné pomocí tlačítka „Doplň INPUTS“ vygenerovat dané hodnoty do nové záložky, tzv. listu, MS Excel. Stanovené nově zapsané údaje vždy přepíší předchozí zápis. V tomto novém listu softwaru je možné pomocí vymazání některých buněk upravovat čas, po který mají být výpočty prováděny. Simulace můžou probíhat od jednoho dne až po 24 let, což je předpokládaná životnost myšleného ZEVO.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with a complex data table. The table is organized into several sections, each with a header row and multiple data rows. The sections include:

- Boilers:** Columns for units (B1-B8), heat output (B_heat_min, B_heat_max), costs (B_costs), CO2 emissions (B_CO2), and efficiency (B_effic).
- Turbogenerators:** Columns for units (TG1-TG6), heat input (TG_in_min, TG_in_max), heat output (TG_out_min, TG_out_max), and efficiency (TG_effic).
- Heat users:** Columns for units (HU1-HU4), heat input (HU_in_min, HU_in_max), and heat output (HU_out_min, HU_out_max).

The table contains numerical data for various parameters, including heat output (GJ/year), costs (USD/GJ), CO2 emissions (kg/GJ), and efficiency (GJ/GJ). The spreadsheet also includes a formula bar at the top showing 'P3B' and a dropdown menu for 'Calibri' font.

Obrázek 4.1 - Rozhraní pro zadávání vstupních údajů v programu Microsoft Excel

Po finálních úpravách všech změn v MS Excel slouží tabulky k dalšímu zpracování. To probíhá pomocí napsaného kódu v programovacím jazyce a následném výpočtu v řešiči The General Algebraic Modeling System (GAMS). Jedná se o vyspělý modelovací systém určený pro matematické programování a optimalizaci. Byl vyvinut pro řešení lineárních, nelineárních i smíšených celočíselných problémů [18]. Vzhled rozhraní GAMS s daným kódem je naznačen na obr. 4.2.

```

par WtE(set WtE)          parametry WtE,
par TG(num_TG, prop_TG)   parametry TG,
par HU(set_D, num_HU)     parametry spotřebitele,
par_profit_help(set_Y)    pomocný parametr pro SDEWES
;

ALIAS(num_TG, num_TG_2);

*načítání množin a parametrů
$CALL GDXRW.EXE V020_input_fin_gwp_pla.xlsm trace=3 @V020_input.txt
$GDXIN V020_input_fin_gwp_pla.gdx

*množiny
$LOAD set_Y set_D prop_B prop_TG set_F num_B num_TG set_TG num_HU aux_num_TG set_P set_WtE set_S_el set_S_GF set_S_LHV set_M set_S_HU
*parametry
$LOAD par_SF par_R_Y par_M_Y par_B par_TG par_HU par_B_flow par_TG_flow par_TG_tgr par_SD aux_par_P par_WtE par_S_HU par_S_el par_S_GF par_S_LHV
$GDXIN

*přepočítání z Kč/MWh na 1000Kč/MWh
par_B(num_B, "B_costs") = par_B(num_B, "B_costs") / 1000;

aux_WtE_heat = 100;
aux_par_WtE_cap = par_WtE("WtE_cap");

SETS
aux_calc_F(calc_F)      množina výnosů a nákladů bez výnosů z tepla a elektřiny /set.calc_F/,
aux_set_F(set_F)        množina cen jednotlivých komodit bez platů zaměstnanců /set.set_F/,
set_B(num_B)            množina všech kotlů mimo WtE /set.num_B/,
num_TG2(num_TG)         množina všech TG mimo WtE /set.num_TG/,
num_TG_alias(num_TG)   množina všech TG pomocná /set.num_TG/;

*odstranění výnosů z tepla a elektřiny z množiny aux_calc_F
aux_calc_F("rev_heat_el") = no;

*odstranění platů zaměstnanců z množiny set_F
aux_set_F("P_emp") = no;

```

Obrázek 4.2 - Rozhraní GAMS se zadaným programem

Program GAMS otevře soubor MS Excel a vybrané hodnoty uloží jako neznámé. Následně s nimi provede matematické operace podle kódu a výsledky zapíše do proměnných, které v závěru slouží jako výstupní parametry.

Jednoduchými úpravami lze kód programu nastavit na rozdílně kladený důraz na provoz ekologický, případně ekonomický. Nastavení probíhá pomocí vyvážení jednotlivých typů provozů. Aby bylo možné porovnávat řádově jiné výsledky pro množství vyprodukovaného CO_2eq a hodnotu nákladů na teplo, jsou oba parametry převedeny do zlomků, kde jsou poděleny typově stejnou hodnotou a vznikne z nich bezrozměrné číslo. Tomuto číslu je přiřazena váha na intervalu $<0;1>$, která udává ekologický, nebo ekonomický směr zaměření provozu [19]. Výsledky tudíž mohou být stanoveny od provozů zaměřených čistě na minimalizaci nákladů až po provoz s minimalizací emise CO_2eq .

4.3 Případová studie

Výše popsaný matematický nástroj byl využit pro simulaci několika scénářů fiktivní sítě CZT založené na částečně reálných parametrech. K tomu účelu se stanovily potřebné parametry tohoto provozu.

4.3.1 Popis parametrů uvažované sítě

Uvažována je samostatná teplárna, která disponuje 7 kotli:

- 2 kotle na lehký topný olej (LTO)
- 3 kotle na zemní plyn (ZP)
- 2 kotle na hnědé uhlí (HU)

Uvažuje se pouze výtopna produkující teplo bez TG, tudíž bez možnosti vyrábět elektrickou energii. Přičemž roční poptávka po teple v dané lokalitě je 229 TJ.

Teplárna může sama o sobě fungovat na různých úrovních ekologické zátěže. Je to dáno faktem, že má zabudované kotle na různá paliva. Kotle mohou být na sobě nezávisle v provozu, tudíž v nich produkované teplo pochází ze spalování odlišných typů paliv. Jak již bylo zmíněno uvažovaná fosilní paliva mají odlišné pořizovací náklady a ekologickou náročnost.

4.3.2 Výsledky

Ze zadaných vstupních technologických parametrů bylo vyhotoveno pomocí matematického softwaru několik scénářů optimálních provozů na základě míry zaměření teplárny na ekologický provoz. Toho je v teplárně dosaženo zvětšujícím se důrazem kladeným na produkci tepla v plynovém kotli, který má sice nižší emise, ale náklady na palivo jsou větší. Výsledky pro dva základní vyhodnocované parametry, produkce CO_2eq a náklady na produkci tepla, jsou shrnuty v tabulce 4.1. V této situaci se jedná pouze o výpočty pro samostatnou teplárnu bez ZEVO. Tabulka ukazuje, že se vzrůstajícím zaměřením na ekologii rostou náklady na produkci tepla a zároveň se zlepšuje dopad na životní prostředí. Tento trend probíhá v této konkrétní teplárně pozvolna do situace dosažení indexu ekologické váhy hodnoty 0.7, kdy dochází k redukci emisí skleníkových plynů cca o 27 % a zároveň náklady vzrostou přibližně o 30 %. Daný provoz se dá považovat za krajní ekologický,

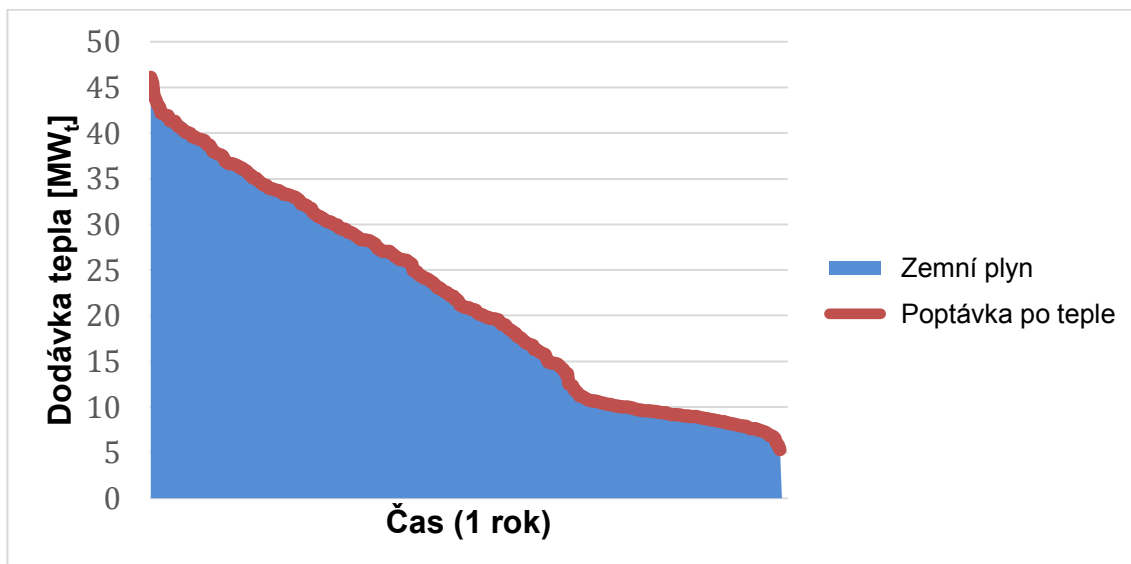
kterého je v reálné situaci možné dosáhnout. Následně sice emise CO₂eq značně klesnou, ale oproti tomu náklady na teplo razantně vzrostou, proto by nebyl pravděpodobně žádnou teplárnou podporován. V posledních třech situacích jsou sledované hodnoty neměnné, a to proto, že už je v provozu po celou dobu pouze kotel na ZP.

Tabulka 4.1 - Náklady na teplo a emise CO₂eq při různých ekologicky a ekonomicky vyvážených provozech teplárny

Index ekologická váhy [-]	Index ekonomické váhy [-]	Náklady na produkci tepla [mil Kč/r]	Množství vyprodukovaného CO ₂ eq [t/r]
0	1	100,24	103535,61
0,1	0,9	102,05	90263,86
0,2	0,8	104,27	84283,36
0,3	0,7	105,78	81978,73
0,4	0,6	106,38	81426,95
0,5	0,5	108,05	80558,87
0,6	0,4	110,63	79584,07
0,7	0,3	130,25	75298,29
0,8	0,2	283,63	46372,87
0,9	0,1	283,63	46372,87
1	0	283,63	46372,87

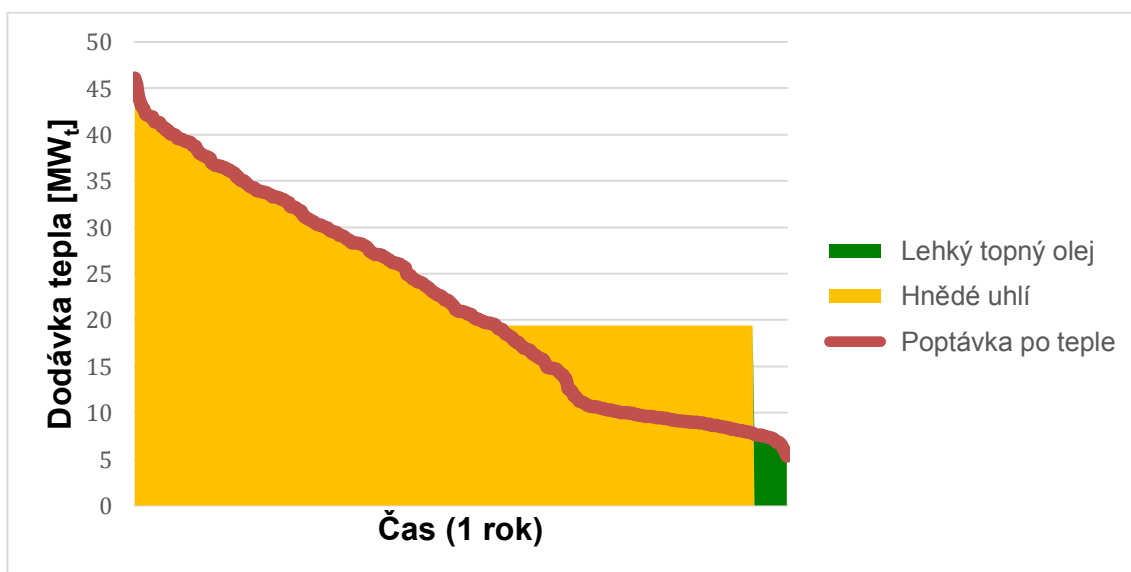
Výsledky provozu jednotlivých typů kotlů v daném ekologickém módu byly vygenerovány do textového souboru. Na jejich základě byly zhotoveny 3 grafy provozu kotlů v teplárně v závislosti na velikosti poptávky po teple. Ta je v následujících diagramech značená červenou linií podle hodnot určených v průběhu 1 roku, které jsou sestupně seřazeny, aby vznikla klesající funkce označující velikost poptávky.

Obr. 4.3 ukazuje variantu, při které je index ekologické váhy 1 a tudíž jsou výpočty zaměřeny pouze na minimalizaci CO₂eq. V provozu po celou dobu je pouze kotel na ZP, který je environmentálně nejpříjemnější.



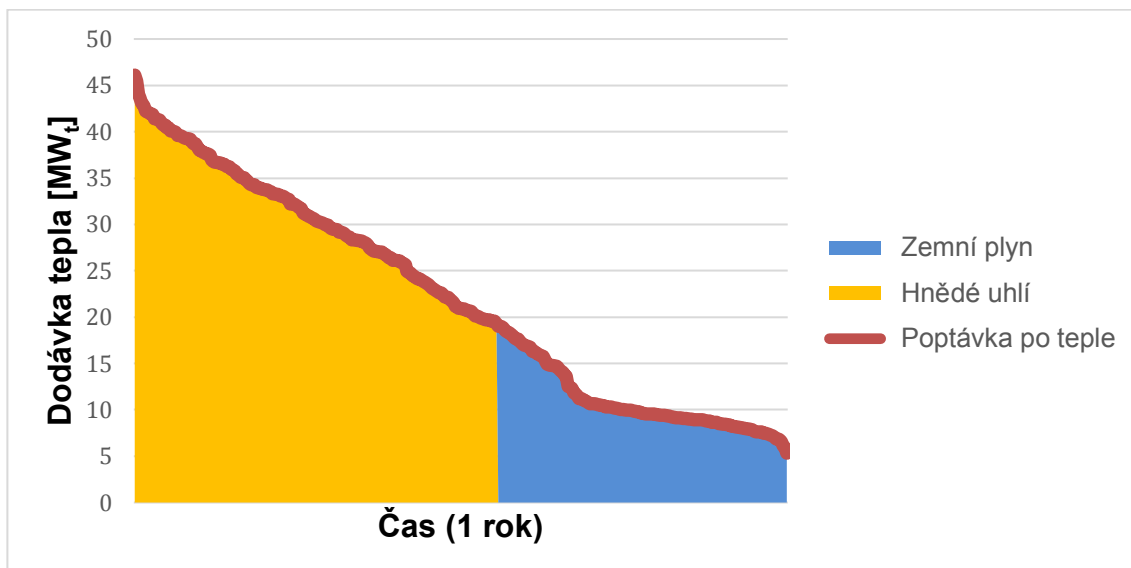
Obrázek 4.3 - Provoz kotlů v teplárně při minimalizaci CO_{2eq}

Opačnou situaci pouze při minimalizaci nákladů zobrazuje obr. 4.4. Zde je využíván pro většinu poptávky kotel na HU, až při poptávce cca 8 MW_t, kdy dodávku přebírá kotel na LTO. Výsledný diagram ukazuje, že při určitém odebíraném množství tepla dochází k nadprodukci. To je způsobeno faktem, že kotel na HU pracuje na minimální výkon, ale dodává více tepla, než je potřeba, ovšem tento provoz je stále levnější než využití jiného typu paliva.



Obrázek 4.4 - Provoz kotlů v teplárně při minimalizaci nákladů

Případ kdy index ekologické váhy je 0.7 a ekonomické 0.3 naznačuje obr. 4.5. Tento případ byl zvolen pro svoje optimální hodnoty emisí CO_{2eq} a cenou nákladů za teplo. Provoz probíhá v kotlích na HU a ZP.



Obrázek 4.5 - Provoz kotlů v teplárně při optimální ekonomické a ekologické bilanci

Následně byla uvažována integrace ZEVO s rozdílnou kapacitou, 10–50 kt/r zpracovaného odpadu. Určené rozmezí bylo stanoveno na základ množství poptávaného tepla.

Výpočty jsou prováděny pro celkovou síť teplárny a ZEVO. Zároveň se jedná o optimalizaci z hlediska minimalizace nákladů, index ekonomické váhy je stanoven jako 1 a ekologické 0, tudíž v teplárně bude v provozu pouze kotel na HU a při určitých nízkých poptávkách po teple kotel na LTO.

V tabulce 4.2 je možné pozorovat, že pro stanovenou lokalitu se vzrůstající kapacitou klesají náklady na produkci tepla. Je to dáno faktem, že při výpočtech uvažujeme náklady na výrobu tepla v ZEVO jako zanedbatelné. Úspora vypuštěných skleníkových plynů je způsobena nahrazováním primárních zdrojů v teplárně. Jelikož ZEVO dodává do sítě CZT určité množství tepla, tak o tuto hodnotu může být snížen výkon kotlů v teplárně na HU a LTO, které mají větší emisní faktor než spalovaný SKO. Ten má pro výpočty uvažovaný emisní faktor 0.22 t CO₂eq/MWh. Množství uspořené skleníkových plynů dosáhne minima při výstavbě ZEVO o kapacitě 20 kt zpracovaného SKO za rok.

ZEVO nemá dostatečný výkon pro pokrytí celé poptávky po teple, tudíž musí být v provozu i teplárna. Kvůli technologickému minimu výkonu teplárenského kotle může docházet často k nadprodukci tepla. U ZEVO uvažujeme, že kotel na SKO musí být stále v provozu a bez možnosti regulace kvůli potřebě spalovat veškerý dovážený odpad. Na základě tohoto uvažovaného parametru roste se zvyšující se kapacitou ZEVO produkce CO₂eq. Protože ke konstantním emisím z kotle v teplárně při minimálním výkonu se přičítají zvětšující se emise produkované v ZEVO. Náklady na celkové teplo zůstávají i pro větší kapacity ZEVO víceméně konstantní. Jestliže uvažujeme náklady na produkci tepla u ZEVO jako nulové, pak celkové náklady systému jsou tvořeny pouze náklady na teplo produkované teplárnou.

Tabulka 4.2 - Náklady na teplo a emise CO₂eq při zavedení ZEVO do původního systému

Kapacita ZEVO [kt/r]	Náklady na produkci tepla [mil Kč/r]	Množství vyprodukovaného CO ₂ eq [t/r]
10	92,37	80397,11
20	82,99	75057,85
30	82,98	77257,85
40	82,97	79457,85
50	82,97	81657,85

5 Závěr

Při nakládání s komunálním odpadem je možné zvolit několik variant řešení popsaných podrobněji v teoretickém úvodu této práce. Jedná se o technologie skládkování, mechanicko-biologického zpracování a spalování odpadu. Právě první zmíněná metoda je v současnosti celosvětově nejvyužívanější. Odpadové hospodářství se ale snaží nacházet náhradu, jelikož toto řešení problematiky má velice negativní vliv na životní prostředí.

Možné řešení přináší výstavba spalovny s energetickým využitím spalín. Tato technologie řeší současně dva problémy. Zaprvé otázku likvidace komunálního odpadu a zadruhé výrobu tepla a elektrické energie ekologičtější způsobem než spalováním fosilních paliv. Právě nahrazení skládkování a ušetření primárních zdrojů při výrobě tepla má zásadní vliv na životní prostředí, převážně na globální oteplování. Při zbudování optimálního ZEVO se totiž zásadně omezí emise produkovaných skleníkových plynů.

V případě návrhu nového ZEVO je nutné vyhodnotit ekologické a ekonomické důsledky a následně jejich společné dopady porovnat. Pro tento účel na pracovišti ÚPI existují matematické modelovací systémy. V této bakalářské práci byl představen nástroj, který pracuje v softwaru MS Excel a k nacházení řešení používá naprogramovaný kód, jenž je zpracován v programu GAMS.

Pomocí těchto postupů byla autorem této práce provedena případová studie pro danou oblast charakterizovanou vstupními údaji. Výstupem optimalizačních procesů je provoz teplárny nacházející se v dané oblasti pro různě kladený důraz na ekologii. Druhým výstupním modelem je situace, při které je k výtopně připojeno ZEVO o odlišných kapacitách zpracovaného komunálního odpadu za rok. Veškeré vyhodnocené situace a závěry z nich plynoucí jsou platné především pro daný, charakterizovaný model. Při odlišných vstupních parametrech se některé závěry mohou lišit.

Z výsledků byly pozorovány především hodnoty stanovující ekonomický a ekologický dopad změn. Finanční situaci představují náklady na teplo a environmentální důsledek je určován na základě vypuštěného $\text{CO}_{2\text{eq}}$ do ovzduší. Obě veličiny se vztahují na výrobu daného, neměnného množství tepla z důvodu možnosti porovnávání.

Matematickým nástrojem bylo stanoveno několik kompromisů mezi náklady a emisemi skleníkových plynů pro provoz teplárny bez ZEVO. Pro stanovený model by byl pravděpodobně vyhodnocen jako nejvýhodnější stav při indexu ekologické váhy 0,7. Při něm výtopna zatápí pouze v kotlích na zemní plyn a hnědé uhlí, jak je naznačeno v obr. 4.5. V dané situaci dochází k optimálnímu poměru mezi emisemi $\text{CO}_{2\text{eq}}$ a navýšení nákladů na teplo, uvedeno v tab. 4.1. Teplárna by mohla nadále snižovat produkci skleníkových plynů, ale pro takové případy už náklady prudce rostou a cena tepla by razantně stoupla.

Alternativou snížení emisí skleníkových plynů změnou provozu kotlů v teplárně je vybudování ZEVO. V takovém případě může mít teplárna v provozu kotle na hnědé uhlí, které jsou neekologické, ale ekonomicky výhodné. Ovšem i přes to bude v celkovém systému docházet k úspoře emisí $\text{CO}_{2\text{eq}}$, jak ukazují výsledky v tab. 4.2.

Vzhledem ke stanovenému optimálnímu řešení v první části je vhodnou alternativou v dané oblasti zbudování ZEVO o kapacitě 20 kt zpracovaného SKO za rok. Jelikož produkce skleníkových plynů je téměř stejná v případě teplárny bez ZEVO pracující s indexem ekologické váhy 0,7 a v případě teplárny se ZEVO o zmíněné kapacitě.

Rozdíl mezi náklady na provoz pouze teplárny a náklady při provozu sítě se ZEVO při produkování stejného množství $\text{CO}_{2\text{eq}}$ ukazují finanční úsporu. Rozdíl nákladů činí zhruba 47 mil Kč/rok v dané situaci snížení emise skleníkových plynů o cca 27 %.

Ze závěrů vyplývá, že v případě výstavby ZEVO pouze z důvodů energetické produkce se teplárně vyplatí odkupovat teplo a ročně za něj platit 47 mil Kč, v dlouhodobém horizontu je nutné uvažovat změny cen paliv, inflace atd. Tato částka ponížená o provozní náklady ZEVO se dá využít na zaplacení nákladů stavby spalovny. Po úplném uhrazení počátečních investic budou následně dané finance vykazovány jako zisk.

6 Seznam použitých zdrojů

- [1] Evropská komise. *Eurostat: Statistics Explained* [online]. 2017 [cit. 2019-04-14]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Waste_generation_by_economic_activities_and_households,_2014_YB17.png
- [2] Komunální odpady. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Ministerstvo životního prostředí, ©2019 [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/komunalni_odpady
- [3] Produkce, využití a odstranění odpadů - 2017. *Český statistický úřad* [online]. Český statistický úřad, 2018 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2017>
- [4] FERDAN, Tomáš a Martin PAVLAS. Energetické využití odpadů a emise skleníkových plynů. *Energetika*. 2018, **68**(2), 5
- [5] EU Emissions Trading System (EU ETS). *European Commission* [online]. 2019 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets_cs
- [6] MALINAUSKAITE, J., H. JOUHARA, D. CZAJCZYŃSKA, et al. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy* [online]. 2017, **141**, 2013-2044 [cit. 2019-04-15]. DOI: 10.1016/j.energy.2017.11.128. ISSN 03605442. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544217319862>
- [7] PURMESSUR, Bhuvaneshwaree a Dinesh SURROOP. Power generation using landfill gas generated from new cell at the existing landfill site. *Journal of Environmental Chemical Engineering* [online]. 2019, **7**(3) [cit. 2019-02-16]. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103060. ISSN 22133437. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213343719301836>
- [8] KARAFIÁT, Josef a kolektiv. Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla. In: *Informační portál Ministerstva průmyslu a obchodu: PROGRAM EFEKT* [online]. Praha, 2006 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>
- [9] Schéma. *Plzeňská teplárenská | ZEVO Plzeň* [online]. Plzeňská teplárenská, ©2019 [cit. 2019-01-27]. Dostupné z: <https://www.zevoplzen.cz/schema>
- [10] Municipal Waste Treatment 2016. In: *CEWEP - The Confederation of European Waste-to-Energy Plants* [online]. CEWEP, 2017 [cit. 2019-02-21]. Dostupné z: <http://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2017/07/graph-2001-2016-1024x532.jpg>

- [11] ISWA State of the art report, 6th edition. In: *ISWA - International Solid Waste Association* [online]. ISWA, 2012 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <https://www.iswa.org/home/news/news-detail/browse/16/article/iswa-waste-to-energy-state-of-the-art-report-6th-edition-available-now/109/programmes/>
- [12] STEHLÍK, Petr. *Up-to-Date Waste-to-Energy Approach: From Idea to Industrial Application* [online]. Heidelberg, Germany: Springer, 2016. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, 8884. ISBN 978-3-319-15466-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-15467-1
- [13] Národní hodnoty EF, výhřevností a oxidačních faktorů. In: *Ministerstvo životního prostředí* [online]. 2018 [cit. 2019-03-07]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/vypoctove_faktory_emise/\\$FILE/eok-NIR_vypocetni_faktory-20180101.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/vypoctove_faktory_emise/$FILE/eok-NIR_vypocetni_faktory-20180101.pdf)
- [14] Statistika: Národní energetický mix. *OTE* [online]. Association of Issuing Bodies (AIB), 2018 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/narodni-energeticky-mix>
- [15] Pokyny pro podávání zpráv k Akčnímu plánu pro udržitelnou energii a Monitorování. In: *Ministerstvo životního prostředí* [online]. 2014 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/pakt_starostu_a_primatoru/\\$FILE/SOPSZP-reporting_guidelines-20151217.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/pakt_starostu_a_primatoru/$FILE/SOPSZP-reporting_guidelines-20151217.pdf)
- [16] FERDAN, Tomáš, Martin PAVLAS, Vlastimír NEVRLÝ, Radovan ŠOMPLÁK a Petr STEHLÍK. Greenhouse gas emissions from thermal treatment of non-recyclable municipal waste. *Frontiers of Chemical Science and Engineering* [online]. 2018, 12(4), 815-831 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1007/s11705-018-1761-4. ISSN 2095-0179. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11705-018-1761-4>
- [17] JANOŠŤÁK, František, Ondřej PUTNA a Martin PAVLAS. Energy Dispatch Model for Integrated Waste-to-Energy Plant. *CEt - CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS*. AIDIC - Associazione Italiana Di Ingegneria Chimica, 2019, (71). ISSN 2283-9216.
- [18] *GAMS: Cutting Edge Modeling* [online]. ©2019 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://www.gams.com>
- [19] PUTNA, Ondřej, František JANOŠŤÁK a Martin PAVLAS, Ondřej Greenhouse Gas Credits from Integrated Waste-to-Energy Plant. *14th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES)*. Dubrovnik 1.-6. 10. 2019.

7 Seznam použitých zkratk a symbolů

GWP	Global Warming Potencial
CO ₂ eq	Ekvivalent oxidu uhličitého
CO ₂	Oxid uhličitý
OH	Odpadové hospodářství
SKO	Směsný komunální odpad
KO	Komunální odpad
EU	Evropské unie
ČR	Česká republika
EU ETC	EU Emissions Trading System
OSN	Organizace spojených národů
LCA	Life-Cycle-Assessment
CH ₄	Metan
MBÚ	Mechanicko-biologická úprava
RDF	Refused-derived fuel
ZEVO	Zařízení pro energetické využití odpadu
EVO	Energetické využití odpadu
TG	Turbogenerátor
KOT	Kondenzační odběrová turbína
CZT	Centrální zásobování teplem
PP	Přehřátá pára
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
HU	Hnědé uhlí
ZP	Zemní plyn
LTO	Lehký topný olej
ÚPI	Ústav procesního inženýrství
VUT v Brně	Vysoké učení technické v Brně
MINLP	Mixed integer non-linear programming
MILP	Mixed integer linear programming
GAMS	The General Algebraic Modeling System
MS	Microsoft
kt	Kilotuna
t	Tuna
r	Rok
Kč	Korun Českých
MWh	Megawatt hodina
TJ	Terajoule
mil	Milion
MWt	Megawatt tepelný

8 Seznam použitých obrázků

Obrázek 1.1 - Hierarchie nakládání s odpady.....	1
Obrázek 1.2 - Nakládání s KO v ČR v roce 2017	2
Obrázek 1.3 - Celosvětové emise skleníkových plynů z různých ekonomických sektorů	3
Obrázek 2.1 - Systém skládky s následným energetickým využitím zachyceného plynu	5
Obrázek 2.2 - Schéma ZEVO Plzeň	7
Obrázek 3.1 - Způsob zpracování odpadu VEU mezi lety 2001-2016	8
Obrázek 4.1 - Rozhraní pro zadávání vstupních údajů v programu Microsoft Excel	16
Obrázek 4.2 - Rozhraní GAMS se zadaným programem	16
Obrázek 4.3 - Provoz kotlů v teplárně při minimalizaci CO ₂ eq.....	19
Obrázek 4.4 - Provoz kotlů v teplárně při minimalizaci nákladů.....	19
Obrázek 4.5 - Provoz kotlů v teplárně při optimální ekonomické a ekologické bilanci	20

9 Seznam použitých tabulek

Tabulka 3.1 - Produkce CO ₂ eq a cena paliv, data z interních výpočtů na ÚPI VUT v Brně	12
Tabulka 4.1 - Náklady na teplo a emise CO ₂ eq při různě ekologicky a ekonomicky vyvážených provozech teplárny.....	18
Tabulka 4.2 - Náklady na teplo a emise CO ₂ eq při zavedení ZEVO do původního systému	21